

УДК 620.19

Л. Х. Коган, А. Н. Сташков

Институт физики металлов УрО РАН

Н. С. Синицына

Уральский федеральный университет,

г. Екатеринбург

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА ВОЗБУЖДАЮЩЕЙ ОБМОТКИ П-ОБРАЗНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

В работе представлены результаты измерений комплексного сигнала П-образного вихретокового преобразователя с ферромагнитным сердечником. Экспериментально установлены оптимальные частоты контроля степени пропаянности для двух групп образцов – неферромагнитных токопроводящих шин и цилиндрических токопроводов диаметром 9 мм и 5,5 мм.

Ключевые слова: Вихретоковый контроль, степень пропаянности, сверхпроводящие соединения.

L. H. Kogan, A. N. Stashkov, N. S. Sinitsyna

SELECTION OF THE OPTIMAL FREQUENCY OF THE SIGNAL EXCITING WINDING OF U-SHAPED EDDY-CURRENT PROBE WITH FERROMAGNETIC CORE

The paper presents the results of the investigations of eddy current parameters of the U-shaped probe. Optimal frequencies of NDT soldering were found for the two groups of samples – nonferromagnetic busbars and cylindrical conductors with diameter 9 and 5.5 mm.

Keywords: eddy current testing, NDT-soldering, superconducting busbars.

Важнейшей отраслью промышленного производства является энергомашиностроение, создающее электрические машины для выработки и передачи электрической энергии. При изготовлении и эксплуатации машин такого типа большое значение имеет качество пайки медных соединений обмоток их статоров. Ухудшение электрического контакта в соединении стержней статоров гидро- и турбогенераторов приводит к существенному

увеличению его сопротивления. Это ведет к локальному увеличению плотности тока, что в свою очередь приводит к существенному увеличению температуры контакта и выходу его из строя. Для предотвращения подобных ситуаций проводят контроль паяных соединений, как в процессе производства гидро- и турбогенераторов, так и во время их плановых ремонтов. Наиболее перспективными и широко применяемыми методами контроля качества паяных соединений являются вихретоковые методы. К достоинствам вихретокового вида контроля следует отнести отсутствие необходимости обеспечения контакта преобразователя с поверхностью объекта контроля, высокую производительность, нечувствительность к таким параметрам окружающей среды, как влажность, давление, загрязненность, и др. [1–3]. По техническим условиям надежными считаются соединения, у которых пропаянность составляет не менее 60 % [4; 5].

Целью данной работы являлся выбор оптимальной частоты для вихретокового преобразователя П-образного типа, используемого для контроля паяных латунных и медных токоведущих соединений различных типоразмеров.

Для измерения вихретоковых параметров паяных соединений была разработана компьютеризированная лабораторная установка, в которой роль измерителя разности фаз и вольтметра выполнял АЦП. Оригинальное программное обеспечение, написанное в пакете NI LabView 2013, позволяло измерять разность фаз сигналов между возбуждающей и измерительной обмотками П-образного вихретокового преобразователя с ферромагнитным сердечником, а также напряжение на измерительной обмотке преобразователя. Для того чтобы увеличить чувствительность преобразователя, соотношение витков возбуждающей и измерительной обмоток составляло 1:10. Так как использовалось АЦП с мультиплексированием каналов, то необходимо было учесть межканальную задержку, дающую погрешность в измерении разности фаз. Поправка, учитываемая при измерении фаз, рассчитывается по формуле (1):

$$\Delta\varphi' = 360^\circ \cdot \frac{f}{N \cdot f_{\text{ц}}} \quad (1)$$

где f – частота сигналов возбуждающей обмотки вихретокового преобразователя, N – количество используемых каналов АЦП, $f_{\text{ц}}$ – частота оцифровки АЦП.

Эксперименты проводились на образцах двух групп. Первая группа образцов представляла собой фрагменты токопроводящих шин, используемых в Большом адронном коллайдере Европейского совета ядерных исследований (ЦЕРН). Шины состояли из сверхпроводящих шин и медных обечаек, соединенных с помощью припоя с серебром. Поперечное сечение шин составляло 10x20 мм. Во вторую группу образцов входили цилиндрические медные токопроводы с латунными наконечниками диаметром 5,5 мм и медными наконечниками диаметром 9 мм. Образцы обеих групп имели разную степень пропаянности. Образцы с 0 % пропаянности были сделаны без пайки, при этом две соединяемые части вставлялись друг в друга и держались за счет трения. Образцы со 100 % пропаянности представляли собой цельные детали, фрезерованные или выточенные из меди или латуни.

По результатам измерений напряжений и разности фаз рассчитывались годографы вносимого напряжения. Для примера на рис. 1 приведены годографы для образцов 1-й группы. Как видно из рис. 1, годографы имеют классический вид для неферромагнитных токопроводящих изделий. Дополнительно при неизменной амплитуде переменного тока возбуждающей обмотки находились оптимальные частоты контроля, при которых разница сигналов между образцами с 0 и 100 % степенью пропаянности была максимальной. Экспериментально установлено, что для образцов 1-й группы (образцы из ЦЕРНа) наибольшая разность сигнала наблюдалась на частоте 120 Гц. Для образцов 2-й группы с медными наконечниками диаметром 9 мм, как следует из рис. 2, наибольшая разность сигналов достигалась при частотах от 0,5 до 1 кГц. Для токопроводов диаметром 5,5 мм с латунными наконечниками рекомендуется проводить контроль при частотах от 3 до 4 кГц.

Параметром контроля может служить как напряжение на измерительной обмотке, так и разность фаз между сигналами возбуждающей и измерительной обмоток преобразователя.

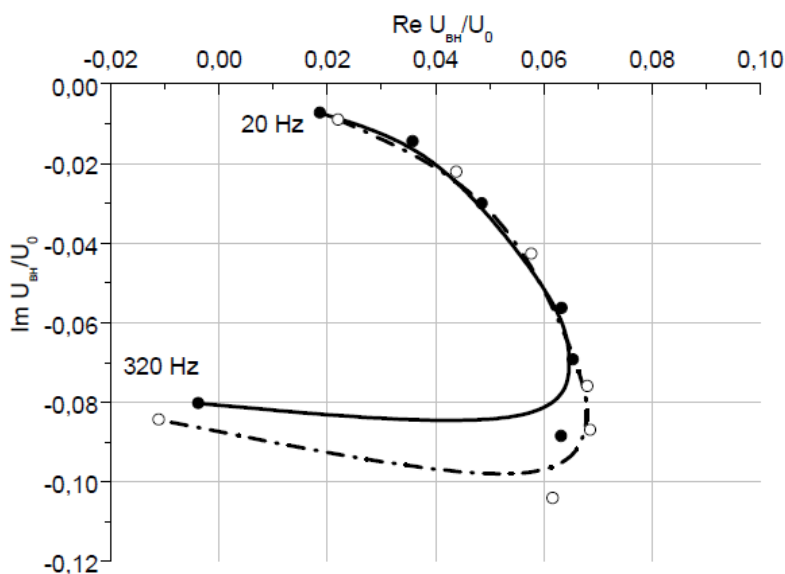


Рис. 1. Годографы вносимого напряжения, измеренные на компьютеризированной установке в диапазоне частот от 20 до 320 Гц для образцов 1-й группы (сплошная линия – 0%, пунктирная – 100% пропаянности)

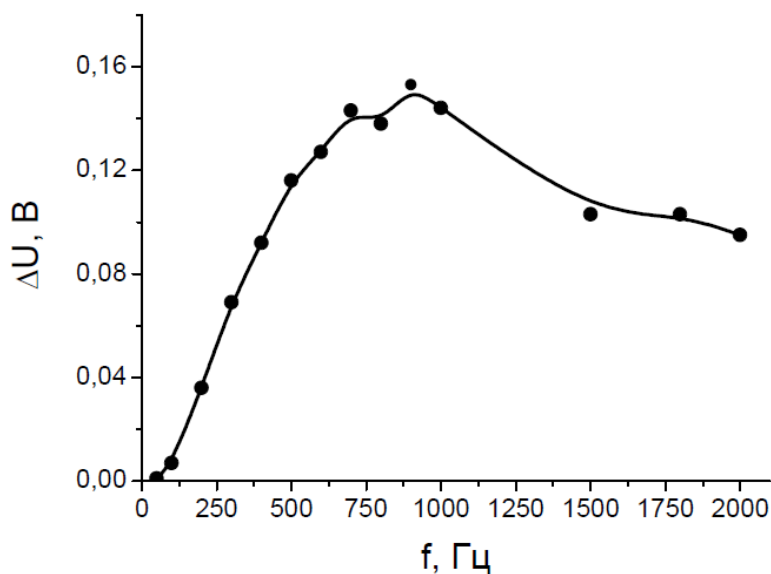


Рис. 2. Зависимость разности напряжений на измерительной обмотке вихретокового преобразователя для образцов 2-й группы с диаметром наконечников 9 мм с 0 и 100 % степенью пропаянности от частоты сигнала

Помимо полностью пропаянного и непропаянного образцов, с завода были получены 2 образца с неизвестной пропаянностью. Требовалось ее установить с помощью измерений на разработанной установке. Для этого на

образцах 2-й группы с латунными наконечниками измерения проводились при частотах возбуждающего тока 3 и 4 кГц. Калибровка проводилась на образцах с 0 и 100% пропаянности. Результаты контроля после усреднения по 10 отсчетам приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что пропаянность образца №1 составила 46% для измерений на частоте 3 кГц и 51% для измерений на частоте 4 кГц. Пропаянность образца №2 составила 76 и 75% для частот 3 и 4 кГц, соответственно.

Таблица 1

Результаты измерения пропаянности образцов 2-й группы с латунными наконечниками

f, кГц	Пропаиваемость, %	
	Образец №1	Образец №2
3	46	76
4	51	75

Было установлено, что чувствительность контроля к степени пропаянности деталей 2-й группы с диаметром наконечников 5,5 мм недостаточно высока. Для улучшения чувствительности необходимо увеличить ток в возбуждающей катушке первичного преобразователя или увеличить соотношение витков возбуждающей и измерительной обмоток датчика. Дальнейшая работа также будет направлена на стабилизацию амплитуды сигнала измерительной обмотки для улучшения метрологических характеристик вихретоковой аппаратуры.

Список литературы

1. Вихретоковый контроль качества пайки токоведущих соединений электрических машин. I. Общие принципы / Е. В. Розенфельд [и др.] // Дефектоскопия, 2010. – № 4. – С. 58–71.
2. Коротеев М. Ю. Вихретоковый контроль качества паяных соединений стержней статорных обмоток турбогенераторов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.11.13 / Коротеев Михаил Юрьевич; [Место защиты: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет „Горный“»], 2014. – 134 с.

3. Реутов Ю. Я., Щербинин В. Е. О комплексной магнитной проницаемости в вихретоковой дефектоскопии/ Ю.Я. Реутов, // Дефектоскопия. – 2012. – № 12. – С. 40–48.
4. Вихретоковый контроль качества пайки токоведущих соединений электрических машин. II. Эксперимент / Л. Х. Коган [и др.] // Дефектоскопия. – 2010. – № 4. – С. 72–82.
5. Конечно-элементное моделирование преобразователя вихретокового контроля качества паяных соединений обмоток турбогенераторов / А. И. Потапов [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – № 5. – С. 21–30.